

UACIS - Entwicklung eines drohnenbasierten Systems für die zerstörungsfreie Bauwerksdiagnostik

Claudia THURNHERR¹, Aurélie MULLER¹, Daniel ALGERNON¹

¹ SVTI Schweizerischer Verein für technische Inspektionen, Wallisellen, Schweiz

Kontakt E-Mail: claudia.thurnherr@svti.ch

Kurzfassung. Das Vorhaben Uncrewed Aerial Concrete Inspection System (UACIS) steht für die Einführung moderner und höchst leistungsfähiger Drohnentechnologie in die Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen (ZfPBau). Drohnen werden als Schlüssel zu Effizienz und Effektivität in der Zerstörungsfreien Prüfung (ZfP) identifiziert.

Ziel der Entwicklung ist die Anwendung des Systems auf Infrastrukturbauten ebenso wie auf Tragwerke in der Energietechnik. Insbesondere Brücken, Containments oder Kühltürme stehen aufgrund ihrer Altersstruktur, Exposition und begrenzten Zugänglichkeit im Fokus der Bauwerksuntersuchungen.

Neben der kontaktlosen Inspektion wird das Drohnensystem zusätzlich in der Lage sein, mechanische Anpresskräfte auf Bauteiloberflächen in fast beliebiger Orientierung aufzubringen. Sonst nur schwer zugängliche Bereiche werden so auch für Kontaktprüftechniken erschlossen und ökonomisch prüfbar. Die zusätzliche Einbindung innovativer Technologien wie insbesondere der Künstlichen Intelligenz trägt neben der Kombination verschiedener Prüfverfahren an einer Drohne dazu bei, vorausschauend Instand zu setzen und damit die Lebensdauer relevanter Bauwerksstrukturen zu maximieren.

Einführung

Regelmäßige technische Inspektionen sind für den Erhalt der Infrastruktur von großer Bedeutung. Insbesondere ist es wichtig, Fehlstellen, Fertigungsfehler oder Defekte, die sich im Laufe der Lebensdauer einer Struktur bilden, rechtzeitig zu erkennen, bevor die Sicherheit nicht mehr gewährleistet ist. Entsprechend steigt die Nachfrage nach zuverlässigen Tools für die Strukturdiagnostik im Bauwesen [1]. Im Gebiet der zerstörungsfreien Prüfung (ZfP) im Bauwesen (ZfPBau) stehen diverse moderne Verfahren zur Verfügung, um solche Inspektionen und Analysen durchzuführen wie z.B. Ultraschall, Bodenradar oder Impact-Echo [2], [3]. Viele Teile der Infrastruktur im Bauwesen sind aufgrund ihrer Höhe schwer zugänglich für Inspektionen. Dazu zählen zum Beispiel Brücken, Türme oder Containments. Klassische Ansätze, um dieses Problem zu überwinden, wie der Einsatz von Gerüsten, Hebebühnen oder Industriekletterern, sind kostenintensiv und aufwändig und stellen ein erhöhtes Risiko für das inspizierende Personal dar. Daher ist die Idee der aktuellen Arbeit, zerstörungsfreie Kontaktprüfung mit moderner Drohnentechnologie zu verbinden, um Inspektionen in großer Höhe robotergestützt und fliegend durchführen zu können.



Einige Schlüsselaspekte der drohnengestützten ZfP-Prüfungen werden im Folgenden zusammengefasst:

- **Zugänglichkeit:** Drohnen können schwer zugängliche oder gefährliche Bereiche erreichen, z. B. im Hochbau, bei Brücken oder Industrieanlagen, ohne dass Gerüste oder Industrie-Kletterer erforderlich sind. Dies verbessert die Zugänglichkeit zu verschiedenen Teilen eines Bauwerks.
- **Vielseitigkeit:** Drohnen können mit einer Vielzahl von Sensoren und Kameras ausgestattet werden, die auf die jeweiligen Inspektionsanforderungen zugeschnitten sind. Zu den gängigen Sensoren gehören visuelle Kameras, Infrarotkameras, LiDAR (Light Detection and Ranging) [4] und heutzutage auch kontaktbasierte Sensoren wie Ultraschallsensoren für Metallinspektionen [5]. Diese Sensoren ermöglichen eine umfassende Bewertung verschiedener Aspekte, wie z. B. strukturelle Integrität oder Materialzusammensetzung.
- **Effizienz:** Drohneninspektionen sind oft schneller als herkömmliche Methoden [6]. Sie können große Bereiche in relativ kurzer Zeit abdecken, was die Gesamtdauer der Inspektion verkürzt und die Ausfallzeiten der Betriebsanlagen minimiert.
- **Kosteneffizienz:** Obwohl die anfänglichen Einrichtungs- und Schulungskosten für drohnengestützte Inspektionen anfallen können, können die Gesamtkosten niedriger sein, wenn man Faktoren wie den geringeren Personaleinsatz, die kürzere Inspektionszeit und die minimale Unterbrechung des Betriebs berücksichtigt.
- **Sicherheit:** Durch die Durchführung von Inspektionen mit Drohnen entfällt die Notwendigkeit, dass sich das Personal physisch in Hochrisikobereiche begeben muss, was die Sicherheit für die Arbeitenden erhöht [7]. Dies ist besonders in Branchen wie der Energiewirtschaft (z. B. in Kernkraftwerken in stark kontaminierten oder verstrahlten Bereichen) und der Infrastruktur (z. B. Brücken in großen Höhen) von Vorteil.
- **Datengenauigkeit und Dokumentation:** Drohnen können hochauflösende Bilder und Daten erfassen, die detaillierte Informationen über den Zustand von Bauwerken liefern. Diese Daten können für genaue Analysen und Dokumentationen verwendet werden, die die Entscheidungsfindung für Wartung und Reparaturen unterstützen.
- **Umweltverträglichkeit:** Im Vergleich zu herkömmlichen Inspektionsmethoden, die schwere Ausrüstung und die Einrichtung einer Infrastruktur erfordern, haben Drohnen einen geringeren ökologischen Fußabdruck, was sie zu einer nachhaltigeren Option macht.

1. Drohnenplattform und System für Betoninspektion

Der Einsatz von mechanisierter und robotergestützten Inspektion wurde in den letzten Jahren immer wichtiger, um Inspektionen schneller, reproduzierbarer und sicherer zu machen [8], [9]. Während sich dabei viele Systeme auf visuelle Inspektion fokussieren, gibt es mittlerweile auch Drohnen, welche Kontaktkräfte aufbringen können und somit für Kontakt-Techniken in Frage kommen. Unser System basiert auf einer Drohnen-Forschungsplattform [10]. Diese Drohne ist in der Lage in einem kontinuierlichen Nick-Winkel von 180° Kontaktkräfte bis 30N aufzubringen und mehrere Sekunden zu halten. Das ermöglicht die Inspektion selbst schwer zugänglicher Bereiche. Für diese Drohnenplattform wurde eine innovative Impact-Echo-Sensoreinheit entwickelt und kontinuierlich optimiert. Ergänzend befindet sich eine Sensoreinheit für die Potenzialfeldmethode in der Entwicklung, um aktive Korrosion zu detektieren.

Zukünftig wird die Integration weiterer ZfP-Verfahren verfolgt, um unserer Vision eines umfassenden drohnenbasiertes Werkzeugs für die zerstörungsfreie Prüfung zu folgen, siehe **Abb 1**.



Abb 1: Vision eines umfassenden drohnenbasierten Werkzeugs für ZfPBau

Die Drohne verfügt über eine kabellose Fernsteuerung, welche es dem Piloten erlaubt, die Drohne zu steuern, die Messung auszulösen und die Messresultate zu sehen. Zusätzlich ist ein kabelloses Inspektionstablet vorhanden, welches der Inspektorin oder dem Inspektor die Messresultate anzeigt und die Möglichkeit bietet, die Messungen zu analysieren, Einstellungen anzupassen und Kommentare zu erfassen.

Abb 2 zeigt die fliegende Drohne bei der Inspektion eines Gebäudes mit der Impact-Echo-Sensoreinheit. Die Drohne fliegt dabei in horizontaler Lage.



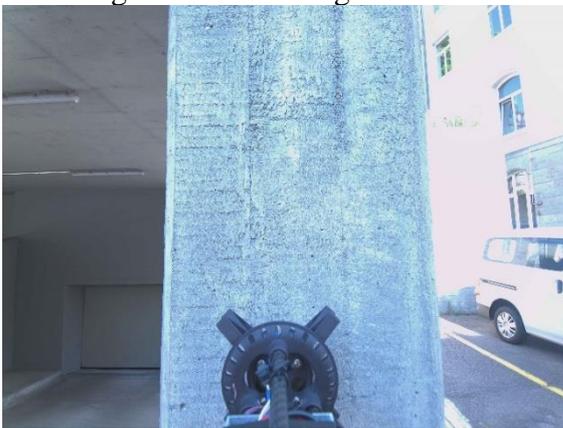
Abb 2: Drohne fliegt in horizontaler Lage und inspiziert ein Gebäude

Abb 3 zeigt die fliegende Drohne in vertikaler Lage beim Inspizieren eines Gebäudes.



Abb 3: Drohne fliegt in vertikaler Lage und inspiziert ein Gebäude.

Neben der Erfassung von kontaktbasierten ZfP-Daten ist die Drohne auch mit Kameras ausgestattet, die gleichzeitig die Erfassung visueller Daten ermöglichen. An jeder Messstelle wird ein Bild in der FPV-Perspektive im Normal- und Weitwinkelmodus aufgenommen. Ein Beispiel für ein solches Bild ist in **Abb 4** zu sehen. Diese Daten können auch für die weitere Nachbearbeitung verwendet werden. Einerseits können diese Daten zur Erkennung von Oberflächendefekten des Betons mit Hilfe von Bildverarbeitungsroutinen für maschinelles Lernen verwendet werden. Andererseits können diese visuellen Daten für die Kartierung der erfassten Signale verwendet werden.



First-person view



First-person view – Weitwinkel

Abb 4: Visuelle Inspektion über die first-person view-Kamera (FPV)

2. Impact-Echo-System

Die erste entwickelte Sensoreinheit für das Drohneninspektionssystem nutzt die Impact-Echo-Methode. Diese Methode wurde das erste Mal 1986 von [11] für Betoninspektionen vorgestellt. Dabei wird mit einem Hammer oder Impactor eine elastische Welle im Beton erzeugt und anschließend die Schwingungsantwort gemessen. Das Signal wird dabei im Zeitbereich aufgenommen und anschließend mit einer Fast Fourier Transformation (FFT) in den Frequenzbereich überführt und da analysiert. Das Messprinzip ist in **Abb 5** dargestellt.

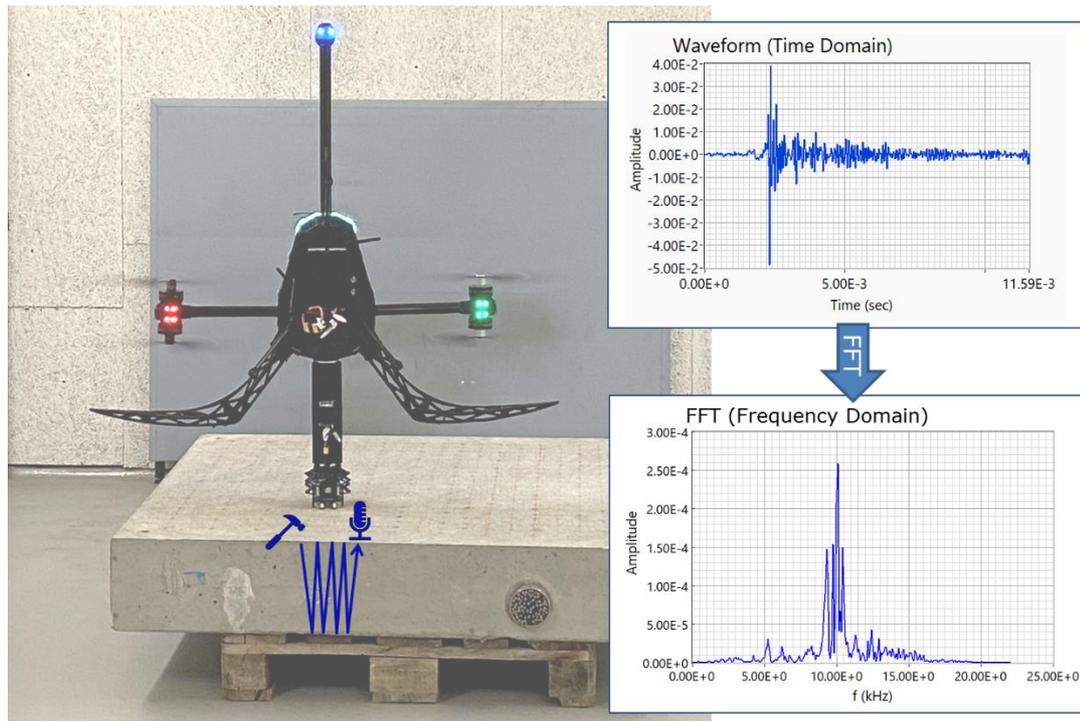


Abb 5: Messprinzip von Impact-Echo dargestellt während einer Drohnenmessung

Impact-Echo wird eingesetzt für Brücken- und Tunnelinspektionen [12], Inspektionen im Energiesektor [13], das Auffinden von Delaminationen [14] oder für die Untersuchung von Spanngliedern [15], [16]. Zudem kann mit Impact-Echo die Schallgeschwindigkeit für ein Bauteil aus einer bekannten Wandstärke (oder umgekehrt) berechnet werden [17], [18]. Dafür wird die Impact-Echo-Gleichung herangezogen, welche die Wandstärke d über die gemessene Frequenz f mit der longitudinalen Schallgeschwindigkeit c_L in Verbindung bringt:

$$d = \frac{c_L}{2f} \quad (1)$$

Die Drohne mit der neu entwickelten Impact-Echo-Sensoreinheit ist in **Abb 6** zu sehen. Dabei wurde ein automatisierter Impactor und ein Sensor von Olson Instruments in einem Sensorarm auf der Drohne integriert. Dies beinhaltete sowohl mechanische, elektrische als auch softwareseitige Aspekte.



Abb 6: Drohnensystem mit Impact-Echo-Sensoreinheit

Mit dem neu entwickelten Impact-Echo-Drohnen-system wurden erste Flugtests durchgeführt. Die Resultate der Messungen werden volumetrisch mithilfe unserer Analysesoftware *echolyst* [19], [20] ausgewertet. Dabei wird für jeden Messpunkt das verarbeitete Zeitsignal in den Frequenzraum überführt und analysiert. Dabei bildet der Ort des Messpunktes die x- und y-Koordinate und das Frequenzsignal wird in z-Richtung aufgetragen. Daraus ergibt sich eine volumetrische Darstellung. Diese kann dann anschließend in 2D-Ebenen in Form von B- (y-Wert konstant), C- (Frequenzwert konstant) und D-Scans (x-Wert konstant) im Detail analysiert werden.

Ein Beispiel für eine solche volumetrische Analyse eines Betonblocks, die in *echolyst* durchgeführt wurde, ist in **Abb 7** dargestellt. Der Betonprüfblock enthält sowohl einen Spanngliedkanal als auch eine Delamination. Beide Prüfziele sind in den B-, C- und D-Projektionen deutlich sichtbar. Darüber hinaus ermöglicht *echolyst* auch die Erstellung und Analyse von Dickenprofilen aus Impact-Echo-Daten sowie die Erfassung von Impact-Echo-Daten in einem Punkt- und einem Gittermodus. Zusätzlich kann die *echolyst* Software auch zur Analyse und volumetrischen Darstellung von Ultraschall-daten verwendet werden.

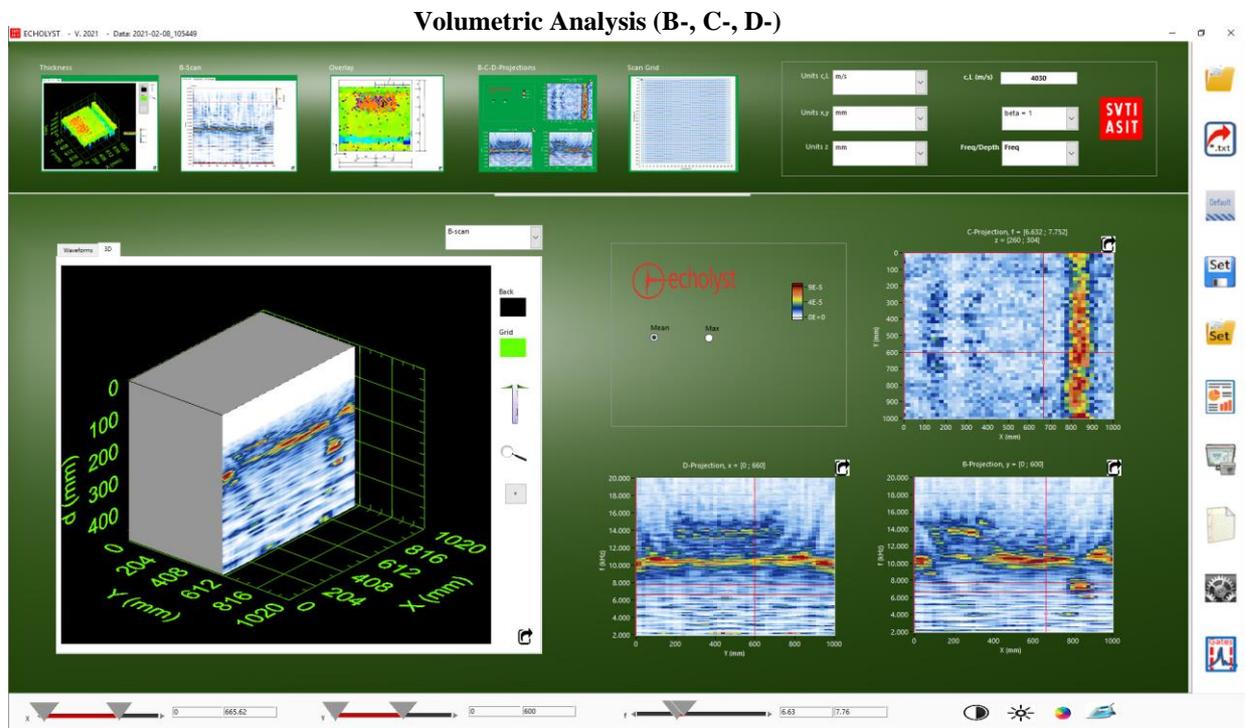


Abb 7: Beispiel einer volumetrischen Analyse von Impact-Echo-Daten durchgeführt mit *echolyst*, die Daten wurden in einer Handmessung aufgenommen.

3. Potentialfeldmesssystem

Ergänzend zum Impact-Echo-Methode befindet sich eine Sensoreinheit für die Potentialfeldmethode in der Entwicklung, um aktive Korrosion zu detektieren, siehe **Abb 8**. Die elektrochemische Potentialmessung kann eingesetzt werden, um Korrosion an Bewehrungen in Stahlbeton zu detektieren [21]. Dabei wird eine Elektrode an der Bewehrung befestigt und anschließend wird mit einer zweiten Elektrode rasterweise Kontakt zur Betonoberfläche hergestellt. Gemessen wird dabei das Spannungspotential zwischen den beiden Elektroden mithilfe eines hochohmigen Spannungsmessgeräts. Die beiden Elektroden müssen dabei mithilfe von Kabeln verbunden werden, daher muss auch die Drohne, welche die mobile Elektrode zur Betonoberfläche bringt, mit einem Kabel mit der Bodenstation

verbunden sein. Die Potentialfeldmethode wird eingesetzt, um aktive Korrosion zu detektieren und zu orten und um Bereiche erhöhter Korrosionswahrscheinlichkeit in Stahlbeton zu identifizieren. Dies ist zum Beispiel im Rahmen von Instandsetzungsmassnahmen sowie bei wiederkehrenden Inspektionen an Stahlbetonbauwerken von Interesse.



Abb 8: Drohnenmesssystem mit Potentialfeld-Sensoreinheit

4. Fazit

Die vorliegende Arbeit präsentiert ein neues drohnenbasiertes Impact-Echo-Messsystem für die Inspektion von Betonstrukturen wie Brücken oder Türme. Dabei wurde eine Sensoreinheit für eine Drohnenplattform entwickelt, welche in der Lage ist, konstante Kontaktkräfte für kontaktbasierte ZfP-Methoden aufzubringen. Dabei wurde ein Impact-Echo-Sensor und -Impactor mechanisch, elektrisch und softwareseitig integriert. Erste Flugtests zeigen, dass die Drohne in der Lage ist, Beton zu untersuchen und Fehlstellen wie Delaminationen sowie Komponenten wie Spannglieder zu identifizieren. Zusätzlich ist eine weitere Sensoreinheit für die Potentialfeldmethode in Entwicklung, um aktive Korrosion zu detektieren. Das System hat viel Potenzial, um bei zukünftigen Inspektionen im ZfPBau die Effizienz, die Effektivität und die Reproduzierbarkeit zu steigern.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei Nicolas Scheidt (Voliro AG) für die Unterstützung bei der Implementierung der Impact-Echo-Sensoreinheit auf dem Drohnencomputer. Zudem bedanken sich die Autoren bei Leonardo Rössler (SVTI) für seine Unterstützung beim 3D CAD Design für die Entwicklung der Impact-Echo-Sensoreinheit.

Referenzen

- [1] Ken P Chong, Nicholas J Carino, and Glenn Washer, "Health monitoring of civil infrastructures," *Smart Mater Struct*, vol. 12, no. 3, p. 483, 2003, doi: 10.1088/0964-1726/12/3/320.

- [2] J.-P. Balayssac and V. Garnier, *Non-destructive testing and evaluation of civil engineering structures*. Elsevier, 2017.
- [3] Christiane. Maierhofer, H.-Wolf. Reinhardt, and Gerd. Dobmann, *Non-destructive evaluation of reinforced concrete structures. Volume 1, Deterioration processes and standard test methods*. CRC Press, 2010.
- [4] H. J. Woo, D. M. Seo, M. S. Kim, M. S. Park, W. H. Hong, and S. C. Baek, “Localization of Cracks in Concrete Structures Using an Unmanned Aerial Vehicle,” *Sensors* 2022, Vol. 22, Page 6711, vol. 22, no. 17, p. 6711, Sep. 2022, doi: 10.3390/S22176711.
- [5] R. J. Watson *et al.*, “Deployment of Contact-Based Ultrasonic Thickness Measurements Using Over-Actuated UAVs,” 2021, pp. 683–694. doi: 10.1007/978-3-030-64594-6_66.
- [6] I. H. Kim, S. Yoon, J. H. Lee, S. Jung, S. Cho, and H. J. Jung, “A Comparative Study of Bridge Inspection and Condition Assessment between Manpower and a UAS,” *Drones* 2022, Vol. 6, Page 355, vol. 6, no. 11, p. 355, Nov. 2022, doi: 10.3390/DRONES6110355.
- [7] M. Gheisari and B. Esmaeili, “Unmanned Aerial Systems (UAS) for Construction Safety Applications,” in *Construction Research Congress 2016: Old and New Construction Technologies Converge in Historic San Juan - Proceedings of the 2016 Construction Research Congress, CRC 2016*, American Society of Civil Engineers (ASCE), 2016, pp. 2642–2650. doi: 10.1061/9780784479827.263.
- [8] R. Bogue, “Applications of robotics in test and inspection,” *Industrial Robot: An International Journal*, vol. 45, no. 2, pp. 169–174, Apr. 2018, doi: 10.1108/IR-01-2018-0012.
- [9] M. Morales-Rodriguez, P. Chen, P. Fuhr, and S. Rooke, “Drones in automation,” *InTech, International Society of Automation*, 2017.
- [10] M. Kamel *et al.*, “The Voliro Omniorientational Hexacopter: An Agile and Maneuverable Tilttable-Rotor Aerial Vehicle,” *IEEE Robot Autom Mag*, vol. 25, no. 4, pp. 34–44, Dec. 2018, doi: 10.1109/MRA.2018.2866758.
- [11] M. Sansalone and N. J. Carino, “Impact-echo: A method for flaw detection in concrete using transient stress waves,” in *United States Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology*, 1986.
- [12] Y. Tinkey, L. D. Olson, and H. Wiggenhauser, “Impact echo scanning for discontinuity detection and imaging in posttensioned concrete bridges and other structures,” *Mater Eval*, vol. 63, no. 1, 2005.
- [13] Algernon D and K. Dressler, “Assessment of structural concrete components using air-coupled impact-echo,” in *Proceedings of the 9th International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components*, Seattle, USA, 2012.
- [14] C. Cheng and M. Sansalone, “The impact-echo response of concrete plates containing delaminations: numerical, experimental and field studies,” *Mater Struct*, vol. 26, no. 5, pp. 274–285, 1993.
- [15] B. J. Jaeger, M. J. Sansalone, and R. W. Poston, “Detecting voids in grouted tendon ducts of post-tensioned concrete structures using the impact-echo method,” *Structural Journal*, vol. 93, no. 4, pp. 462–473, 1996.
- [16] H. Wiggenhauser, “Duct inspection using scanning impact-echo,” in *proceedings of International Symposium NDT-CE 2003, Tendon ducts*, 2003.
- [17] M. J. Sansalone and W. B. Streett, “Impact-echo. Nondestructive evaluation of concrete and masonry,” 1997.
- [18] G. G. Clemeña and others, “Use of the impact-echo method in nondestructive measurements of the thickness of new concrete pavements,” 1995.

- [19] D. Algernon, S. Feistkorn, M. Hagenbruch, P. Kicherer, L. Rössler, and M. Scherrer, “ECHOLYST - Entwicklung eines Impact-Echo-Systems für Scanning, Analyse und Machine Learning,” 2021. [Online]. Available: <http://www.ndt.net/?id=25759>
- [20] D. Algernon, “ECHOLYST Impact-Echo Data Acquisition and Analysis - User Manual.” SVTI Swiss Association for Technical Inspections, Wallisellen, 2020.
- [21] DGZfP-Fachausschuss für Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen – Unterausschuss Korrosionsnachweis für Stahlbeton and C. Sodeikat, “Merkblatt B3 - Elektrochemische Potentialmessungen zur Detektion von Bewehrungsstahlkorrosion Veröffentlicht vom DGZfP-Fachausschuss für Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen - Unterausschuss Korrosionsnachweis für Stahlbeton,” *Beton- und Stahlbetonbau*, vol. 105, no. 8, pp. 529–538, Aug. 2010, doi: 10.1002/best.201000043.